

УЗАГАЛЬНЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ МІЖ ГІДРОМЕТЕОРОЛОГІЧНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ В РАЙОНІ КАХОВСЬКОГО ВОДОСХОВИЩА ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ВИПАРОВУВАННЯ З ЙОГО ВОДНОЇ ПОВЕРХНІ

В статті наведені графічні та аналітичні залежності між гідрометеорологічними показниками в районі Каховського водосховища для визначення випаровування з його водної поверхні за період експлуатації.

Ключові слова: залежність, температура, дефіцит, водяна пара, випаровування води.

Вступ. Однією з важливих витратних складових водних балансів великих водосховищ є суттєві втрати води на випаровування, які мають великий практичний інтерес для різних галузей господарства, які тісно пов'язані з використанням водних ресурсів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженнями випаровування займалися В.В. Шулейкин, М.І. Будико, О.Р. Константинов, Б.Д. Зайков, О.П. Браславський та З.О. Вікуліна, М.В. Чеботарьов, С.М. Крицький і М.Ф. Менкель, М.С. Каганер, В.К. Давидов, В.І. Кузнецов, В.С. Голубев, Т.Г. Федорова, В.О. Римшей та Р.В. Донченко, С.М. Нургалієв, В.П. Кожевніков, Р.І. Гета, а також Д.Л. Лайхтман, Хортон, Міллер, Пенман, Торнтвейт, А. Майер (США). Деякі автори пропонували для розрахунків випаровування прості залежності (В.В. Шулейкин), емпіричний метод (О.П. Браславський і З.О. Вікуліна), рекомендації М.В. Чеботарьова для попередніх розрахунків на ранніх стадіях проектування, рекомендації М.С. Каганера щодо спрощеного підходу при визначенні вихідних даних для розрахунків випаровування, а також наближений метод розрахунків Майера[1]. Крім цього в практиці інженерних розрахунків використовують також карти ізолій середньообагаторічного випаровування з водної поверхні та схему районування України на основі визначення внутрішньорічного ходу випаровування.

Емпіричні формули і методи, спрощені та наближені методи тільки підкреслюють трудомісткість розрахунків випаровування з водної поверхні.

Метою даної роботи є отримання графічних та аналітичних залежностей між гідрометеорологічними показниками в районі Каховського водосховища для визначення випаровування з його водної поверхні за період експлуатації

Основними матеріалами дослідження є гідрометеорологічна інформація з Каховської гідрометеорологічної обсерваторії за 55 років (1956-2010 рр.) експлуатації Каховського водосховища, складові водних балансів за період експлуатації [2].

Каховське водосховище – шоста сходинка Дніпровського каскаду – здійснює сезонне та частково багаторічне регулювання стоку з коливанням рівнів у межах 3 м. Площа водозбору становить 482000 км², середньообагаторічний річний стік – 52,2 км³. Повна та корисна ємність водосховища дорівнюють 18,2 і 6,8 км³ відповідно, площа водного дзеркала водосховища становить 2155 км², довжина його – 230 км, максимальна та середня глибини – 36 і 8,4 м відповідно. У водосховищі виділяють п'ять ділянок. Перша ділянка від м. Н.Каховка до с. Бабіно – пригреблева, найбільш глибока зона шириною 5-6 км, глибиною від 13 до 25 м, а інколи і 36 м. Площа першої ділянки – 495 км². Друга ділянка від с. Бабіно до м. Нікополь шириною 8-15 км, переважаючи глибини – 10-12 м, площа другої ділянки дорівнює 532 км². Третя ділянка від м. Нікополь до с. В.Тарасівка шириною від 8 до 16 км з глибинами 8-10 м. Площа третьої ділянки дорівнює 365 км². Гідрологічний режим другої та третьої ділянок – перехідний від річкового до озероподібного. Четверта ділянка від с. Благовіщенка до

с. Плавні – заплавна, відокремлена від руслової – п'ятої ділянки – піщаною грядою і має вигляд мілководного озера з переважаючими глибинами 3-5 м, а також велика площа і з глибинами 1 м. Площа четвертої ділянки становить 690 км². Руслова – п'ята – ділянка розташована від с. В.Тарасівка до с. Розумовка. Площа п'ятої ділянки 73 км².

Основним методом дослідження розрахунку шару випаровування з водної поверхні водосховищ є прості емпіричні формули, для яких використовується стандартна гідрометеорологічна інформація [2-12]. В основу їх покладено закон французького фізика Дальтона про пропорційність випаровування різниці парціального тиску водяної пари над цією поверхнею. Структура розрахункової залежності має вигляд

$$E = B \cdot n \cdot (e_0 - e_{200}) \cdot (1 + bw_{200}), \quad (1)$$

де E – випаровування з водної поверхні за місяць, мм;

B – числовий коефіцієнт, який сумарно враховує вплив на процес випаровування деяких його факторів;

n – кількість днів у місяці;

e_0 – середній за місяць тиск насиченої водяної пари, який розраховується за температурою водної поверхні, гПа;

e_{200} – середній за місяць парціальний тиск водяної пари на висоті 2 м над водною поверхнею, гПа;

b – числовий коефіцієнт;

w_{200} – середньомісячна швидкість вітру на висоті 2 м над водною поверхнею, м/с.

Значення числового коефіцієнта B , запропоноване різними авторами, різне. Так за методом теплового балансу він дорівнює 0,18, за формулою Б.Д. Зайкова і М.С. Каганера – 0,20, за формулою А.П. Браславського і З.А. Вікілуної – 0,13, за формулою Державного гідрологічного інституту (ДГІ) СРСР – 0,14, за формулою А.І. Шерешевського і Л.К. Синицької – 0,37.

Числовий коефіцієнт b дорівнює: 0,44 – за методом теплового балансу; 0,72 – за формулами Б.Д. Зайкова, А.П. Браславського і З.А. Вікуліної, ДГІ; 0,56 – за формулою М.С. Каганера; 0,14 – за формулою А.І. Шерешевського і Л.К. Синицької.

Для розрахунку середньої швидкості вітру на висоті 2 м над водосховищем використовуються матеріали спостережень по флюгеру двох-трьох метеорологічних станцій, одна з яких береться яка опорна, а інші вважаються контрольними і вибираються таким чином, щоб вони відрізнялися від опорної за ступенем їх захищеності. За опорну береться станція з найдовшим рядом спостережень, місцем розташування, захищеністю і типом флюгера, які не змінювалися протягом розрахункового періоду (не менше 15-20 років).

Середня швидкість вітру над водосховищем на висоті 2 м (w_{200} , м/с) визначається за формулою [13,14]

$$w_{200} = k \cdot w_{\phi}, \quad (2)$$

де k – коефіцієнт, що враховує ступінь захищеності метеорологічної станції на суші, характер рельєфу в пункті спостережень, середню довжину розгону повітряного потоку; w_{ϕ} – швидкість вітру на висоті флюгера.

За даними Каховської гідрометеорологічної обсерваторії для Каховського водосховища коефіцієнт $k = 0,9$.

Тиск насичення водяної пари (e_0 , гПа) розраховується по температурі води на поверхні Каховського водосховища за допомогою таблиці з [14], за формулою (3) або за графіком $e_0 = f(t_{вод})$ (рис. 1):

$$\lg e_0 = 10,79574 \cdot \left(1 - \frac{T_1}{T}\right) - 5,02800 \cdot \lg \frac{T}{T_1} + 1,50475 \cdot 10^{-4} \times$$

$$\times \left[1 - 10^{-8,2969 \left(\frac{T}{T_1} - 1\right)} \right] + 0,42873 \cdot 10^{-3} \left[10^{4,76955 \left(1 - \frac{T_1}{T}\right)} - 1 \right] + 0,78614; \quad (3)$$

де $T_1 = 273,16 \text{ K}$ ($t_1 = 0,01 \text{ }^\circ\text{C}$) – температура рівноваги між водою, льодом та водяною парою;

T – температура по абсолютній шкалі, яка пов'язана з температурою водної поверхні по шкалі Цельсія співвідношенням $T = 273,15 + t_{вод}$.

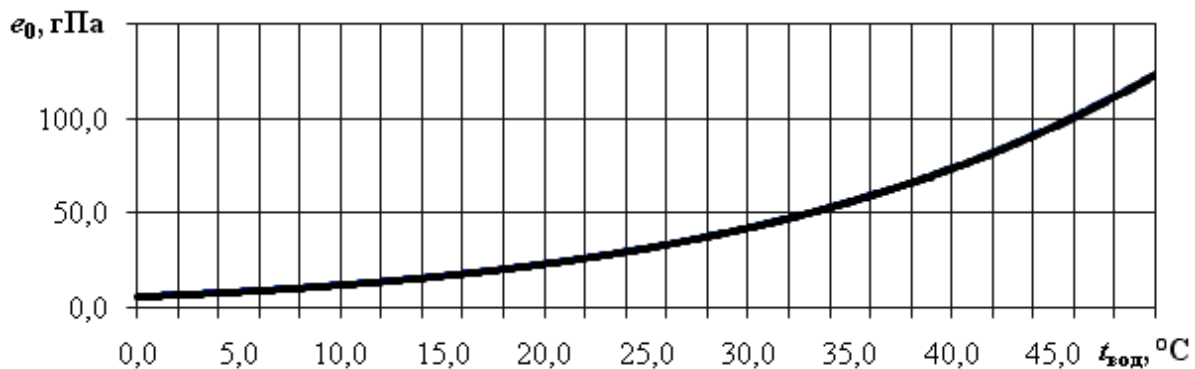


Рис.1 – Зв'язок тиску насичення водяної пари e_0 від температури водної поверхні $t_{вод}$ Каховського водосховища

Парціальний тиск водяної пари e_{200} розраховується [13] за формулою

$$e_{200} = e'_{200} + \left(0,8e_0 - e'_{200}\right)M, \quad (4)$$

де e'_{200} – середня за розрахунковий інтервал часу вологість повітря, виміряна на береговій станції, мб; M – коефіцієнт трансформації, що залежить від середньої довжини розгону повітряного потоку над водосховищем і різниці між температурою водної поверхні і температурою повітря на метеостанції.

Для простоти визначення парціального тиску водяної пари в повітрі О.С. Корягіною одержані графічна (рис.2) та аналітична емпіричні залежності його від середньомісячної температури повітря на метеорологічних станціях вздовж Каховського водосховища:

$$e_{200} = 0,50 \cdot t_{нов} + 4,87, \quad (5)$$

де $t_{нов}$ – середньомісячна температура повітря, $^\circ\text{C}$;
0,50 ; 4,87 – числові коефіцієнти.

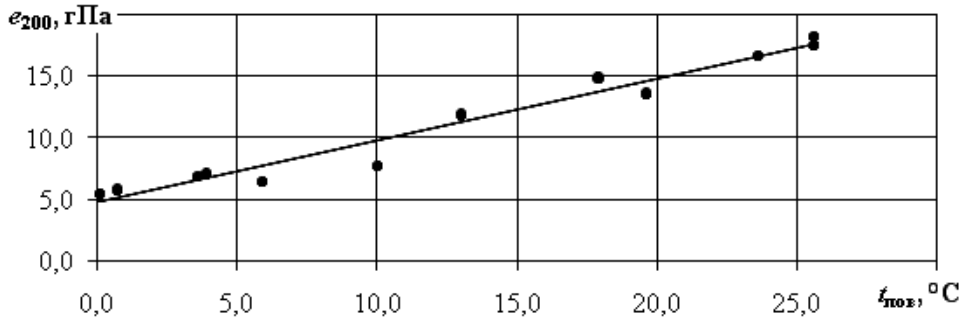


Рис. 2 – Залежність $e_{200} = f(t_{пов})$ для Каховського водосховища

Відомо, що різниця між тиском насиченої водяної пари (e_0) і парціальним тиском водяної пари (e_{200}) – це дефіцит насичення, який визначається температурним режимом та надходженням вологи в атмосферу. З підвищенням температури повітря тиск насичення зростає більш інтенсивно, ніж парціальний тиск водяної пари [15,16]. Виходячи з цього, виявлена графічна залежність дефіциту насичення водяної пари ($e_0 - e_{200}$) від температури водної поверхні Каховського водосховища та його ділянок для характерних років (рис.3).

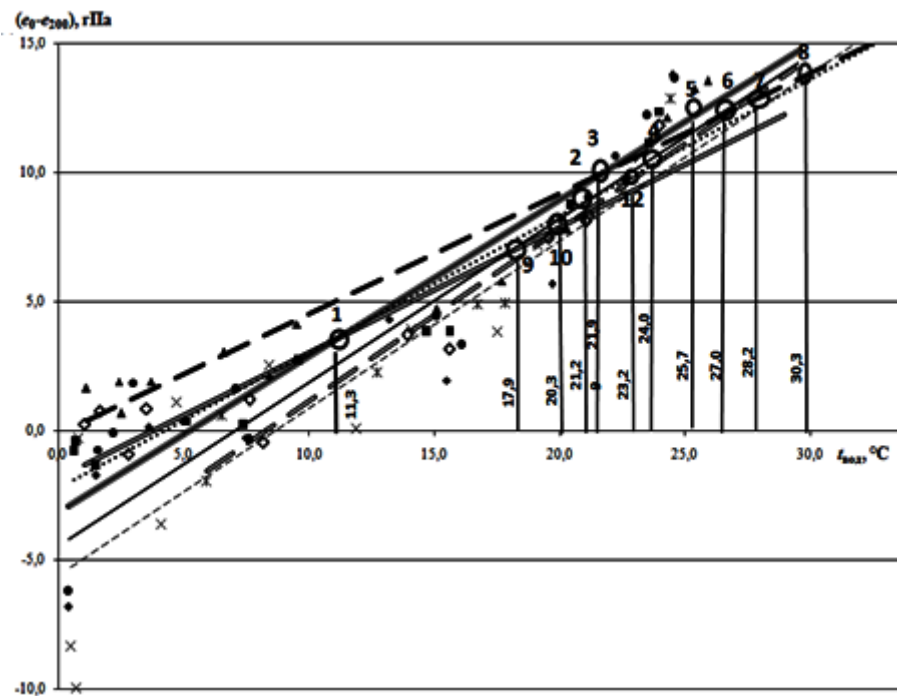


Рис. 3 – Залежність $(e_0 - e_{200}) = f(t_{вод})$ для характерних років експлуатації Каховського водосховища:

- | | | | |
|--------------------|-----------------------|-----------------------------------|---------------------|
| —◆— 1970 - r=0,967 |■ 1972 - r=0,937 | —▲— 2007 - r=0,956 | ---× 1980 - r=0,891 |
| —Ж— 1997 - r=0,965 | —●— 1975 - r=0,938 | —◇— середньобагаторічне - r=0,936 | |


1997 – максимальний за водністю рік; 1972 – мінімальний за водністю рік;
 2007 – максимальний за величиною шару випаровування рік; 1980 – мінімальний за величиною шару випаровування рік; 1997 – максимальний за величиною шару опадів рік; 1975 – мінімальний за величиною шару опадів рік.

Слід відзначити, що побудовані прямі для характерних років перетинаються та утворюють систему характерних точок, для яких спостерігається загальна величина температури води та дефіциту насичення водяної пари над водосховищем (табл. 1).

Відзначимо, що на 8-й характерній точці (рис.3, табл.1) перетинаються протилежні за значенням річного шару випаровування лінії, тобто в цій точці при $t_{вод}=30,3$ °С дефіцит насичення водяної пари буде однаковим для 2007 та 1980 рр. і складатиме $(e_0 - e_{200})=13,8$ гПа. Це свідчить про те, що зі збільшенням температури води дефіцит насичення водяної пари наближується від року з максимальним до року з мінімальним випаровуванням. До речі, слід відзначити дуже високі значення коефіцієнтів кореляції залежності $(e_0 - e_{200}) = f(t_{вод})$.

Таблиця 1 – Точки перетину залежностей $(e_0 - e_{200}) = f(t_{вод})$ для характерних років

№ точок	Перетин прямих (роки)	Температура води, $t_{вод}$, °С	Дефіцит насичення водяної пари, $(e_0 - e_{200})$, гПа	Коефіцієнт кореляції, r
1	1975×1972× середньобагаторічне	11,3	3,5	0,938×0,937×0,936
2	1972×1970	21,2	8,7	0,937×0,967
3	1975×2007	21,9	10,0	0,938×0,956
4	1997×1972	24,0	10,3	0,965×0,937
5	2007×1970	25,7	12,0	0,956×0,967
6	2007×1997×1970	27,0	12,3	0,956×0,965×0,967
7	1972×1980	28,2	12,5	0,937×0,891
8	2007×1972×1980	30,3	13,8	0,956×0,937×0,891
9	середньобагаторічне ×1970	17,9	6,9	0,936×0,967
10	середньобагаторічне ×1997	20,3	7,9	0,936×0,965
11	середньобагаторічне ×1980	23,2	9,2	0,936×0,891

За середньобагаторічними даними (рис. 3, крива ) аналітична залежність дефіциту насичення водяної пари від температури води має вигляд

$$(e_0 - e_{200}) = 0,49 \cdot t_{вод} - 1,83. \quad (6)$$

Коефіцієнт кореляції цієї залежності становить $r=0,94$.

Для розрахунків випаровування використовується осереднена температура води по всій акваторії водосховища ($t_{вод}$, °С). Для її оперативного визначення для Каховського водосховища отримана графічна (рис. 4) та аналітична (7) залежності від середньомісячної температури повітря ($t_{нов}$, °С).

$$t_{вод} = a \cdot t_{нов} + d \quad (7)$$

де a, d – числові коефіцієнти, які дорівнюють для ділянки 1 $a = 0,91, d = 2,30$, для ділянки 2 – $a = 0,94, d = 1,90$, для ділянки 3 – $a = 0,95, d = 1,70$, для ділянки 4 – $a = 0,96$,

$d = 1,44$, для ділянки 5 – $a = 0,94$, $d = 1,75$, для акваторії Каховського водосховища – $a = 0,94$, $d = 1,75$.

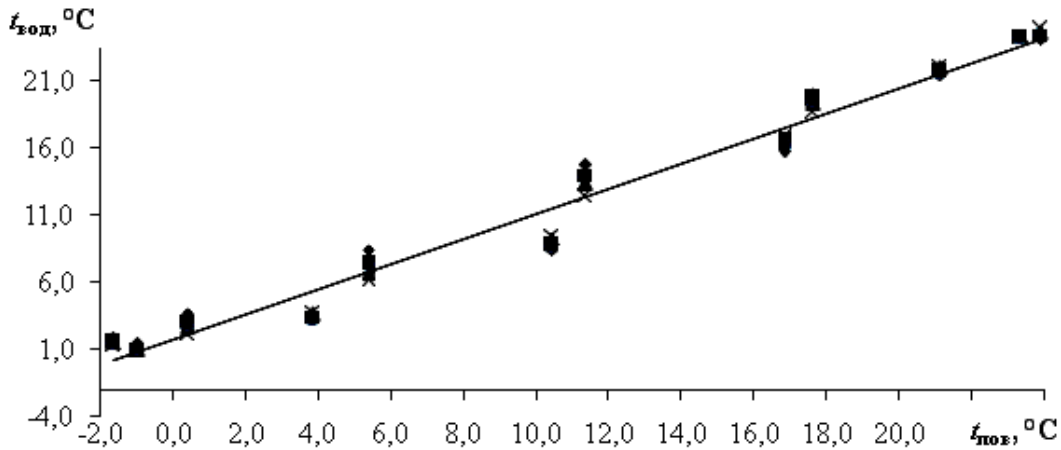


Рис. 4 – Залежність $t_{вод} = f(t_{пов})$ для Каховського водосховища

З використанням формул (1) – (7) та площі водної поверхні Каховського водосховища визначені середньомісячні шари випаровування, а також їх зв'язок з дефіцитом насичення водяної пари над поверхнею водойми для чотирьох характерних років його експлуатації (рис.5).

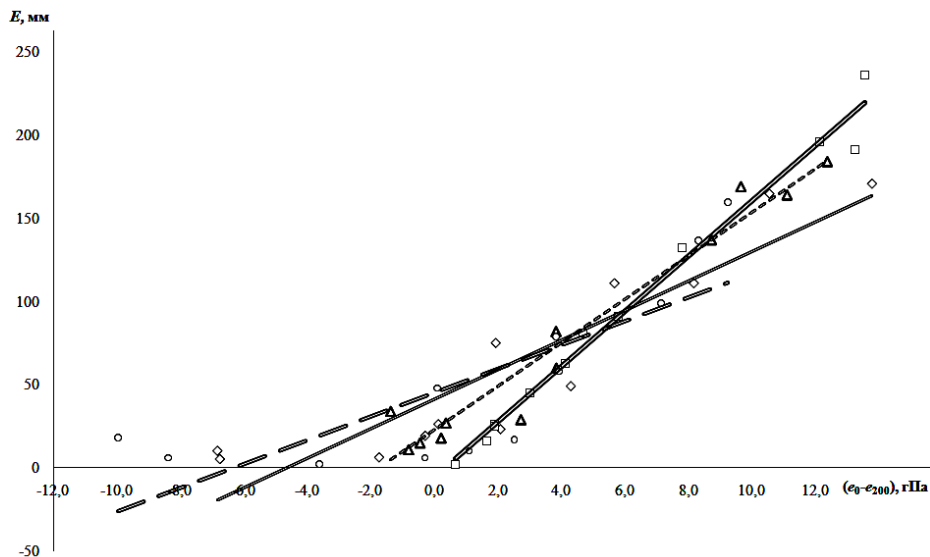


Рис. 5 – Залежність шарів (E) випаровування від дефіциту насичення водяної пари ($e_0 - e_{200}$) для Каховського водосховища:

—◇— E , 1970 р. - - - Δ E , 1972 р. —○— E , 1980 р. —□— E , 2007 р.

Відзначимо високі значення коефіцієнтів кореляції для розглянутих залежностей (рис. 5) від 0,80 до 0,99. Лінії залежностей $E = f(e_0 - e_{200})$ для 2007 р. (з високим річним випаровуванням) і 1972 р. (маловодним за стоком), а також для 1980 р. (з низьким річним випаровуванням) і 1970 р. (багатоводним за стоком) збігаються, як і на рис. 3.

Для Каховського водосховища також виявлені аналітичні залежності між шаром випаровування і дефіцитом насичення водяної пари $E = f(e_0 - e_{200})$ для середньобагаторічних показників з детермінантом кореляції $R^2=0,96$

$$E = 13,17 \cdot (e_0 - e_{200}) + 15,66, \quad (8)$$

де W_e – об'єм випаровування з водної поверхні, млн. м³;

E – шар випаровування з водної поверхні, мм;

$(e_0 - e_{200})$ – дефіцит насичення водяної пари над водною поверхнею;

13,17; 15,66 – числові коефіцієнти.

Виявлені та узагальнені для Каховського водосховища графічна (рис. 6) і аналітична (10) залежності середньомісячного об'єму випаровування E , мм від середньомісячної для водосховища температури водної поверхні $t_{вод}$, °C та його п'яти ділянок.

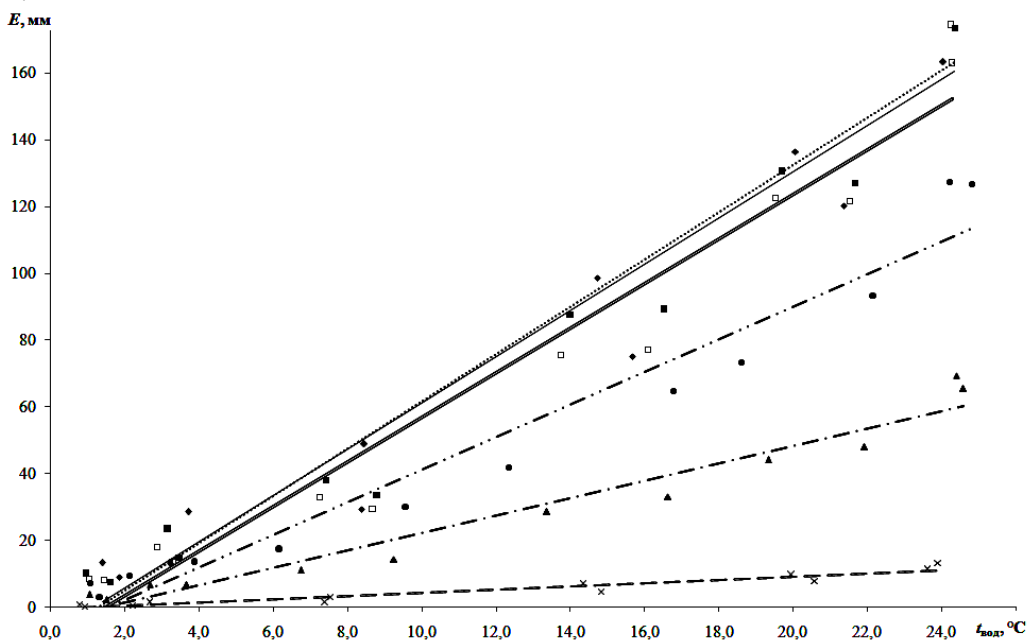


Рис. 6 – Залежність $E = f(t_{вод})$ для Каховського водосховища:

- | | | |
|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| —◆— ділянка 1; $r = 0,97$ |■ ділянка 2; $r = 0,98$ | -.-.-▲ ділянка 3; $r = 0,98$ |
| -.-.-● ділянка 4; $r = 0,98$ | = = ✱ ділянка 5; $r = 0,96$ | ====□ акваторія; $r = 0,98$ |

$$E = m \cdot t_{вод} - c, \quad (9)$$

де m , c – числові коефіцієнти для ділянки 1 дорівнюють $m = 6,93$ та $c = 8,18$, для ділянки 2 – $m = 7,09$ та $c = 9,40$, для ділянки 3 – $m = 2,60$ та $c = 3,79$, для ділянки 4 – $m = 4,89$ та $c = 7,85$, для ділянки 5 – $m = 0,49$ та $c = 0,71$, для акваторії Каховського водосховища – $m = 6,67$ та $c = 9,89$.

Об'єм втрат води на випаровування визначається як добуток шару випаровування (E , мм) на площу водного дзеркала (F , км²).

Висновки та рекомендації.

1. Встановлені взаємозв'язки між гідрометеорологічними характеристиками дадуть змогу оперативно здійснювати оптимізацію режимів функціонування Каховського водосховища.
2. Запропоновані науково-методичні підходи, які реалізовані на прикладі Каховського водосховища, можуть бути корисними й для інших водойм проточного типу.

Література

1. *Обухов С.В., Корягина О.С., Корецький Є.П.* Порівняльні розрахунки випаровування з водної поверхні Каховського водосховища в сучасних умовах // Вісник Одеського державного екологічного університету. – Одеса, 2012. – Вип. 13. – С.187-195.
2. *Щорічні дані про режим та ресурси поверхневих вод суші.* 1955-2012 р. – Том 2. – Випуск 2.
3. *Браславский А.П., Нургаліев С.Н.* Новая формула для расчета испарения с учетом разности температуры воды и воздуха // Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства. – 1966. – Вип. 4. – С. 195-206.
4. *Голубев В.С.* Методы измерения и расчета испарения с водной поверхности. – Л.: Гидрометеиздат, 1981. – С. 249-265.
5. *Голубев В.С., Вуглинский В.С., Кокорева К.М.* Методика расчета средней многолетней температуры поверхности воды в водоемах по данным наблюдений водоиспарительной сети // Тр. ГГИ. – 1981. – Вип. 279. – С. 75-93.
6. *Кожевников П.О.* О расчете испарения с водоемов с учетом температурной стратификации атмосферы // Тр. ГГИ. – 1969. – Вип. 158. – С. 97-105.
7. *Корягина О.С., Обухов С.В.* Залежність випаровування з водної поверхні Каховського водосховища від температурного фактора / Матер. міжнар. наук. конф. студентів та молодих вч. «Актуальні проблеми сучасної гідрометеорології». – Одеса: ТЕС, 2012. – С.88-89.
8. *Корягина Е.С., Обухов Е.В.* Обобщенные оценки показателей испарения с водной поверхности Каховского водохранилища / Матер. XIII наук. конф. молодых вч. ОДЕКУ. – Одеса: ТЕС, 2013. – С. 116.
9. *Обухов С.В.* Випаровування з водосховищ українських гідровузлів та його питомі показники // Причорномор. еколог. бюл. – 2007. – №4 (26). – С. 167-173.
10. *Обухов С.В.* Питомі показники випаровування з водосховищ українських гідровузлів // Метеорологія, кліматологія та гідрологія. – 2008. – Вип.50, ч.ІІ. – С. 128-136.
11. *Обухов С.В.* Формула для визначення втрат води на випаровування з водної поверхні Дністровського водосховища / Збірник Матер. 5-го Міжн. Еколог. Форуму «Чисте МІСТО. Чиста РІКА. Чиста ПЛАНЕТА». – Херсон: ХТПП, 2013. – С. 239-244.
12. *Руденко С.И.* Вопросы расчета потерь на испарение при проектировании водохранилищ // Тр. ГГИ. – 1941. – Вип. 11. – С. 255-287.
13. *Обухов Е.В., Корягина О.С.* Оцінка впливу швидкості вітру над водною поверхнею на випаровування з Каховського водосховища / Збірник Матер. 5-го Міжн. Екол. Форуму «Чисте МІСТО. Чиста РІКА. Чиста ПЛАНЕТА». – Херсон: ХТПП, 2013. – С. 244-250.
14. *Обухов С.В., Корягина О.С.* Температурний фактор та випаровування з Каховського водосховища / Сборник Матер. VIII-ой междунар. научно-практ. конф. «Проблемы экологической безопасности и развития морехозяйственного и нефтегазового комплексов». – Одесса: Пассаж, 2012. – С.198-209.
15. *Указания по расчету испарения с поверхности водоемов.* – Л.: Гидрометеиздат, 1969. – 83 с.
16. *Беспалов Д.П., Матвеев Л.Т., Козлов В.Н., Наумова Л.И.* Психрометрические таблицы. – Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 270 с.
17. *Клімат України* / За ред. В.М. Ліпінського, В.А. Дячука, В.М. Бабіченко. – К.: Вид-во Раєвського, 2003. – 343 с.
18. *Степаненко С.М., Польовий А.М., Школьнік Є.П. та ін.* Оцінка впливу кліматичних змін на галузі економіки України / За ред. С.М. Степаненка, А.М. Польового. – Одеса: Екологія, 2011. – 696 с.

Generalized dependence between hydrometeorological characteristics Kakhovka reservoir. Obukhov E.V., Koryagina E.S.

The article presented graphical and analytical dependences between hydrometeorological parameters in the area Kakhovka reservoir for determining the evaporation of its water surface during operation.

Keywords: addiction, temperature, shortage, water vapor, evaporation.

Обобщенные зависимости между гидрометеорологическими характеристиками в районе Каховского водохранилища для определения испарения с его водной поверхности. Обухов Е.В., Корягина Е.С.

В статье приведены графические и аналитические зависимости между гидрометеорологическими показателями в районе Каховского водохранилища для определения испарения с его водной поверхности за период эксплуатации.

Ключевые слова: зависимость, температура, дефицит, водяной пар, испарения воды.